

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360130

研究課題名(和文) 普及型重粒子線癌治療装置用超伝導コイルシステム開発のための基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental studies on superconducting coil system of heavy-ion accelerator for cancer therapy

研究代表者

石山 敦士 (ISHIYAMA ATSUSHI)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00130865

研究成果の概要(和文)：我が国が世界有数の実績を持つ重粒子線がん治療技術を広めるためには、装置の一層の小型化、高効率化が必要となる。本研究は癌治療用サイクロトロン超伝導化を目指し、その前提となる高温超伝導線材の超伝導特性と機械特性の耐放射線性に関する評価実験と、中性子線照射後の RI 生成物評価試験を実施した。それらの結果、加速器用線材として致命的な特性劣化は観測されなかった。実験研究と並行して、放射線医学総合研究所の HIMAC (400MeV/核子, 300nA) と同等の出力を有する加速器に必要な超伝導コイルの設計を試み、小型・高効率化の可能性を示した。

研究成果の概要(英文)：Japan has a good track record in the heavy-ion radiotherapy which is a powerful method for cancer treatment. To expand this excellent therapeutic technique onto the world stage, the development of further reduced size, high-efficiency and low-cost accelerator. To realize the application of HTS (High Temperature Superconductor) coil to cyclotron system, we conducted preliminary experiments of the neutron irradiation to HTS tapes. And we made radioactive analyses on HTS tapes and measured the superconducting characteristics before and after the irradiation. We also performed a trial design of HTS coil for medical cyclotron system.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
年度			
総計	14,400,000	4,320,000	18,720,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：電気機器, 医療用加速器, 超伝導応用

1. 研究開始当初の背景

高齢化社会のさらなる進展とともに、癌患者は今後も増加し、2015年までに500万人を超えるものと予想されている。癌の主な治療法として、手術療法、化学療法、放射線治療

法の3つがあるが、重粒子線(炭素線)を用いた放射線治療は、悪性腫瘍を根治的に治療させるだけでなく、手術に比較してQOLの向上が期待でき、高齢者を含めた広い範囲で適用できるという長所を有している。そして、

社会の高齢化が進み、地域医療の高度化が必須となってくる中で、高度先進医療の1つであり、我が国が世界で最も多くの実績を積み重ねてきた「重粒子線癌治療」の普及拡大が強く望まれている。しかし医療用加速器として稼働しているものは、1994年に世界に先駆けて設置された放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba : HIMAC) と、兵庫県立粒子線医療センター、群馬大学重粒子線照射施設 (2010年3月治療開始) の3施設と、ドイツ1施設の4か所のみとなっている。これらの重粒子加速器はシンクロトン方式が採用されており、いずれも広大な敷地、莫大な建設コスト、数多くの電磁石の励磁・冷却のための運転コストおよび維持費のために普及が困難な状態にある。従って必要となる加速器の小型・軽量化とともに高効率化、省エネルギー化が、重粒子線がん治療の普及・拡大のために急務となっている。以上のような背景のもと、近年の高温超電導線材の急速な性能向上と応用機器開発の進展の状況から、筆者らは、HIMAC と同等の出力 (400MeV/核子, 300nA) を持つ高温超電導技術を活用した小型・高効率・高性能の重粒子線がん治療用超電導加速器の開発を最終目標とすることにした。

2. 研究の目的

「次世代の普及型重粒子放射線癌治療装置の開発」を目指し、その端緒となる取り組みとして、本研究の目的を「癌治療用サイクロトロンの超伝導化」に置いた。そして、サイクロトン用コイルに使用する超伝導線材として、次世代線材として期待され、日米欧を中心に研究開発競争が激化しているイットリウム系 (以下「Y系」と略記する) 超伝導線材を選択し、本研究を実施することとした。そして、「発生磁界: ~3T, 蓄積エネルギー: ~3MJ, 運転温度: 50K以上 (冷凍機伝導冷却方式を採用) のサイクロトン用Y系超伝導コイルを開発する」という数値目標を定め (本研究で実際に実施した試設計においては、~6T, 20K以上とした)、本研究の3年間で、それを実現するための基盤技術の確立を目指した。具体的には、サイクロトン用超伝導コイルとしての要求仕様を満足するための設計・製作に必要なY系超伝導線材の耐放射線性評価、実運転環境下を想定した電磁氣的、機械的な側面からの材料特性評価を行うとともに、それらに基づくコイルシステム設計技術 (含む、計算機シミュレータの開発) の確立を目指した。そして最終的に得られた成果をまとめ、サイクロトン用コイルの設計を試み、Y系コイル適用の可能性と有効性を検証することとした。

3. 研究の方法

(1) 耐放射線性評価実験

現在市販されている高温超伝導線材である YBCO 線材 (米国: AMSC 社製) と Bi-2223 線材 (住友電工社製) を試料として以下の耐放射線性に関する評価実験を行った。YBCO 線材は MOD/RaBiTs 法で作製されたもので、幅 4.4mm, 厚さ 0.22mm のテープ形状で、臨界電流 I_c は約 70A である。Bi-2223 線材は Controlled over pressure 法で作製されたもので、幅 4.4mm, 厚さ 0.22mm のテープ形状で、臨界電流 I_c は約 140A である。

① 中性子照射試験

Bi系およびY系超伝導線材については、加速器コイル用としての耐放射線性に関するデータはほとんどなかった。そこで、本研究ではまず加速器応用の前提となる超伝導線材の耐放射線性を評価した。さらに当該超伝導線の放射化の程度を放医研で実際にRI製剤を製造しているHM-18小型サイクロトン周辺の中性子フラックスと同等とみなして推定した。

初年度(2008年度)は、放医研の低線量タンデム加速器を用いて照射試験を実施した。Beターゲット上の deuterium(重水素)電流は 400 μ A でターゲットからの距離 117cm で照射野直径 30 cm, 照射線量率は 2Gy/h である。2009・2010年度は、放医研のサイクロトン (AVF-930) を用いて繰り返し照射試験を実施した。図1のように、サイクロトンビーム取り出し口下流の Be ターゲット下 10 cm の距離に被試験線材を置き 14MeV の中性子を照射する。Be ターゲット上での deuterium 電流は 20 μ A であり、照射野の直径は 5 cm である。照射位置より 2m 下流の線量率は 0.46Gy/min であり、非試験線材の位置では約 11kGy/h となる。この照射を 7 時間継続して行った (1 回あたりの照射量は 77kGy)。この照射を 2 年間で計 7 回繰り返し、各照射ごとに超電導特性 (I-V 特性) を測定し、中性子照射による特性劣化の有無を調べていった。被照射線材は最終的に約 539kGy (\approx 0.5MGy) の照射を受けたことになる。なお、被試験線材位置での 1 照射あたりの中性子フラックスは 1.74×10^{15} neutron/cm² である。

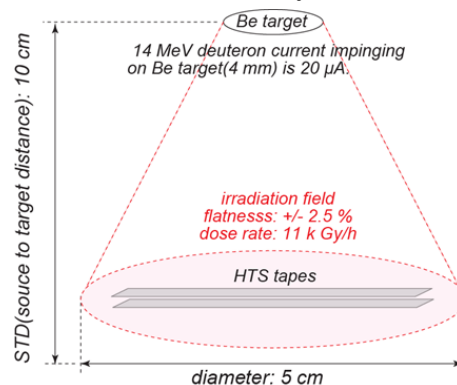


図1 中性子照射試験の概要図

② 中性子線照射後の RI 生成物評価試験

放射線環境中で用いる機器の放射化はメンテナンス時の装置運用や被ばく管理上好ましくない。さらに機器廃棄時にも高レベル廃棄物となる可能性を考慮する必要がある。そこで Y 系および Bi 系超伝導試料線材にサイクロトロンからの 14MeV 中性子を照射した後、試料の放射能が持ち出し基準以下 (GM 計数管で 130CPM 以下) になったことを確認後、Ge 検出器により試料線材中に生成した RI をガンマ線スペクトルより推定した。さらに当該超伝導線の放射化の程度を放医研で実際に RI 製剤を製造している HM-18 小型サイクロトロン周辺の中性子フラックスと同等とみなして推定した。

③ 機械特性評価試験

中性子照射による超伝導線材の機械特性を評価した。まず超伝導コイルの運転時 (励磁・減磁) に超伝導線材に加わる機械的ひずみを模擬して試料線材のひずみ特性を評価するための試験装置を作製した (図 2)。試料線材は、Stainless Steel (SUS304) 製の U 字型サンプルホルダの底面に半田で接着し、図中の A 点を上下に動かすことによって U 字型サンプルホルダが変形し試料線材にひずみが印加される仕組みとなっている。サンプルホルダ全体を液体窒素に浸漬した状態で実験を行った。

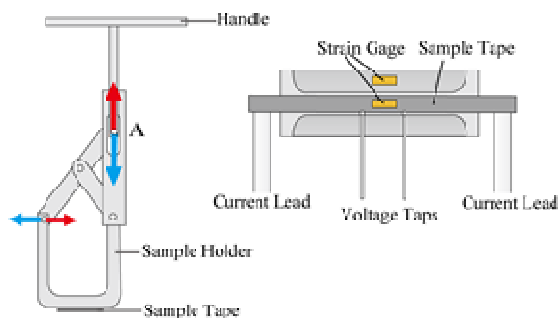


図 2 機械特性評価試験装置

(2) 加速器用超伝導コイルの試設計

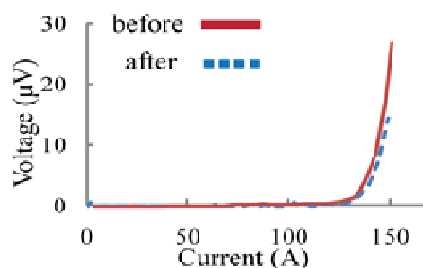
本研究で得られた高温超伝導線材の耐放射線性に関する基礎データ (超伝導特性・機械特性) を拠り所 (コイル設計の条件) として、放医研の重粒子線加速器 (HIMAC) と同等の出力 (400MeV/核子, 300nA) を持つサイクロトロン用超伝導コイルの設計を試みた。HIMAC はシンクロトロン方式であるが、ここでは連続ビームが得られるという医療用として好ましい特長を持つサイクロトロン方式を対象とした。サイクロトロン用コイルには、等時性磁場発生用と Azimuthally Varying Field (AVF) 発生用がある。ここでは、超伝導化による機器の小型化の可能性を検証するため、等時性磁場発生用コイル (スプリットコイル) の試設計を行った。

4. 研究成果

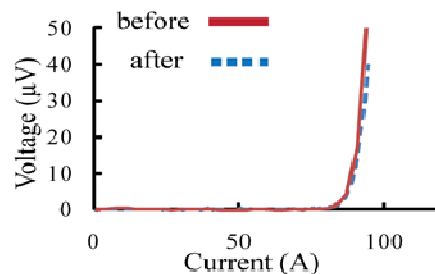
(1) 耐放射線性評価実験の結果

① 中性子照射試験の結果

図 3 に Bi 系と Y 系試料線材の中性子照射前と 7 回照射後 (539kGy) の超伝導特性 (I-V 特性) の比較を示す。Bi-2223, YBCO 線材ともに照射前に比べて数回照射した後の方がわずかに臨界電流 (I_c) が上昇しているように見える。しかし上昇値はきわめて微量であり、実験誤差の範囲内である。さらに 7 回照射後についても I_c に目立った変化は見られなかった。また、n 値 (I-V カーブの立ち上がりを表す指標) に関しても大きな変化はなかった。総照射線量と I_c の関係においても、はっきりとした関連性は見えていないが、本研究における照射試験においては超伝導特性の明確な影響は確認されなかった。今後は外部磁界中での超伝導特性の耐放射線性の評価試験を行う必要がある。



(a) Bi-2223 線材



(b) YBCO 線材

図 3 中性子照射前後の I-V 特性の比較

② RI 生成物評価試験の結果

① の 3 回目の照射後、13 日経過してから RI 生成物を計測した。表 1, 2 に Bi-2223 線材内と YBCO 線材内に生成したガンマ線放射性核種およびその由来元素を Ge スペクトルから推定した結果を示す。Bi 系試料線材においては、 ^{110}Ag (半減期約 250 日) と ^{207}Bi (半減期約 11500 日) の生成が観測された。Y 系試料線材については、 ^{110}Ag (半減期約 250 日)、 ^{54}Mn (半減期約 312 日)、 ^{60}Co (半減期約 1923 日) が生成された。いずれも全体量が少なく、照射 2 週間後の表面放射線は問題の無いレベルであった。高温超伝導線材の耐放射線性に関する報告は世界的にもほとんどなく、ここで得られたデータは極めて有用と考える。

表 1 中性子線照射後(231kGy)の RI 生成物 (Bi-2223 試料線材) [測定時間: 1.0E+05s]

半減期 (日)	核種	エネルギー (keV)	放出確率	放射能 (Bq)
6.24	206Bi	803.1	98.9	999.6
8.46	106Ag	1045.8	29.6	7629.2
41	105Ag	344.5	41.4	1880.6
249.79	110Ag	657.8	94.4	3907.1
250.4	110Ag	657.8	94.4	0.3
11515.8	207Bi	569.7	97.7	7.3

表 2 中性子線照射後(231kGy)の RI 生成物 (YBCO 試料線材) [測定時間: 1.0E+05s]

半減期 (日)	核種	エネルギー (keV)	放出確率	放射能 (Bq)
8.46	106Ag	1045.8	29.6	329.9
11.5	113Sn	391.7	64	57.5
13.6	117Sn	158.6	86.4	1071.5
41	105Ag	344.5	41.4	86.9
44.5	59Fe	1099.2	56.5	23.9
70.92	58Co	810.8	99.4	9360.3
77.27	56Co	846.8	99.9	88.0
106.65	88Y	1836.6	99.2	12.5
249.79	110Ag	657.7	94	330.1
271.79	57Co	122.1	85.6	2331.5
312.12	54Mn	834.8	100	52.6
1923.55	60Co	1332.5	100	90.9

③ 機械特性評価試験の結果

試料線材にひずみ ε を印加してゆき、 $1\mu\text{V}/\text{cm}$ 基準で I_c を測定した。これを中性子線照射前後で行い、ひずみと I_c/I_{c0} の関係 ($I_c/I_{c0}-\varepsilon$ 特性)の変化を調べた。Bi-2223 線材、YBCO 線材の結果をそれぞれ図 4,5 に示す。ともに照射前・照射後でひずみに対する超電導特性の大きな変化は観測されなかった。

以上の耐放射線性評価実験は、いずれも液体窒素中において行ったが、実機においては、冷凍機伝導冷却方式の採用が望まれる。そこで、伝導冷却下で、かつ通電状態での照射試験を可能とする装置を新たに開発し、本研究期間内に冷却・通電試験を完了した。

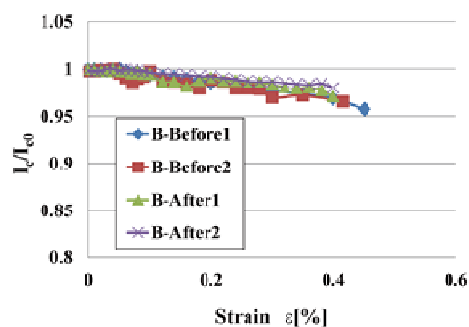


図 4 照射前後の機械特性 (Bi-2223 線材)

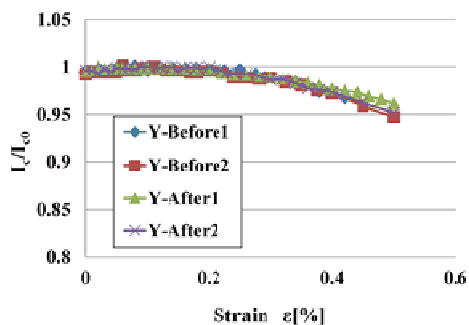


図 5 照射前後の機械特性 (YBCO 線材)

(2) 加速器用超伝導コイルの試設計

YBCO 線材の使用を想定し、超伝導特性、機械強度特性等を考慮し、最大発生磁場 6T、運転温度 20K として等時性磁場発生用円形スプリットコイル (3 対) の設計を試みた。その結果、コイルの外径は最大 3.3m、コイル冷却に必要な冷凍機電力は約 50kW が得られ、小型化・高効率化の可能性が示された。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件:内 1 件は掲載決定)

- [1] T. Aoki, H. Ueda, A. Ishiyama, Y. Miyahara, N. Kashima, S. Nagaya, "Neutron irradiation effects of high temperature superconductors," IEEE Trans. on Applied Superconductivity, (査読有) Vol.21, to be published.
- [2] H. Ueda, A. Ishiyama, K. Shikimachi, N. Hirano, S. Nagaya, "Stability and Protection of Coils Wound with YBCO Bundle Conductor", IEEE Trans. on Appl. Superconductivity, (査読有) Vol.20, No.3, pp. 1320-1323, 2010.
- [3] Y. Kawai, A. Ishiyama, H. Ueda, S. Nagaya, K. Shikimachi, N. Hirano, "Determination of stabilizer thickness for YBCO coated conductors based on coil protection," Physica C: Superconductivity, (査読有) Vol.470, No.20, pp.1865-1869, 2010.
- [4] H. Ueda, A. Ishiyama, N. Miyahara, N. Kashima, S. Nagaya, "Radioactivity of YBCO and Bi-2223 Tapes Under Low

Energy Neutron Flux”, IEEE Trans. Applied Superconductivity., No.19, (査読有) Vol.3, pp. 2872-2876, 2009.

[学会発表] (計 15 件)

- [1] 石山敦士, 王旭東, 福田光宏, 畑中吉治, 植田浩史, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「次世代重粒子線がん治療用超電導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトロン」の開発」電気学会全国大会, 2011年3月17日, 大阪大学豊中キャンパス (震災のため中止)
- [2] 石山敦士, 王旭東, 福田光宏, 畑中吉治, 植田浩史, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「次世代重粒子線がん治療用超電導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトロン」の試設計」電気学会全国大会, 2011年3月17日, 大阪大学豊中キャンパス (震災のため中止)
- [3] 神林佑, 青木徹, 石山敦士, 宮原信幸, 植田浩史, 鹿島直二, 長屋重夫「中性子照射による高温超電導線材の特性変化」電気学会超電導応用電力機器研究会, 2011年1月20日, 住友電工大阪製作所
- [4] 石山敦士, 王旭東, 福田光宏, 畑中吉治, 植田浩史, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「高温超電導技術を活用した「先進ハイブリッド・サイクロトロン」の開発」電気学会超電導応用電力機器研究会, 2011年1月20日, 住友電工大阪製作所
- [5] 石山敦士, 福田光宏, 畑中吉治, 宮原信幸, 横田渉, 鹿島直二, 長屋重夫「次世代超電導サイクロトロンの開発」電気学会超電導応用電力機器研究会, 2010年6月10日, 九州電力総合研究所
- [6] 神林佑, 青木徹, 植田浩史, 石山敦士「高温超電導線材の中性子照射実験」, 2010年度春季低温工学・超電導学会, 2010年5月13日, 川崎市産業振興会館
- [7] 陸旭棟, 青木徹, 神林佑, 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸, 「粒子線がん治療用加速器応用を想定した高温超電導線材の中性子照射実験」, 電気学会超電導応用電力機器研究会, 2010年1月25日, 名古屋大学
- [8] X. Lu Xudong, H. Ueda, A. Ishiyama, N. Miyahara, N. Kashima, S. Nagaya, “Characteristics of HTS under radiation environment”, 21st International Conference on Magnet Technology, Heifei, China, 2009
- [9] 青木佳明, 川井優季, 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 渡辺智則, 平野直樹, 山本潔, 「銅メッキ YBCO 超電導線材の疲労特性試験」, 2009年度秋季低温工学・超電導学会, 11月19日, 岡山大学
- [10] 植田浩史, 石山敦士, 式町浩二, 平野直樹, 長屋重夫, 「YBCO 超電導コイルの安定性と保護」, 2009年度秋季低温工学・超電導学会, 11月19日, 岡山大学
- [11] 青木徹, 陸旭棟, 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸, 「高温超電導線材の中性子照射実験」, 2009年度秋季低温工学・超電導学会, 11月18日, 岡山大学
- [12] 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「高温超電導線材の放射化特性」2008年度秋季低温工学・超電導学会, 11月13日, 高知市文化プラザホール
- [13] H.Ueda, A.Ishiyama, N.Miyahara, N.Kashima, S.Nagaya, “Radiation damage properties of HTS conductors”, Applied Superconductivity Conference, 2008年8月20日, Chicago, USA
- [14] 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「高温超電導線材の放射化実験」電気学会超電導応用電力機器研究会, 2010年6月13日, 琉球大学
- [15] 植田浩史, 石山敦士, 鹿島直二, 長屋重夫, 宮原信幸「高温超電導線材の放射化実験」2008年度低温工学・超電導学会, 2008年5月26日, 明星大学

[その他]

ホームページ: 早稲田大学石山敦士研究室
<http://www.eb.waseda.ac.jp/ishiyama/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

石山 敦士 (ISHIYAMA ATSUSHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00130865

(2)連携研究者

- ・山川 宏 (YAMAKAWA HIROSHI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00097263
- ・若尾 真治 (WAKAO SHINJI)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 70257210
- ・植田 浩史 (UEDA HIROSHI) (H22 まで)
早稲田大学・理工学術院・講師
研究者番号 10367039
- ・宮原 信幸 (MIYAHARA NOBUYUKI)
(独)放射線医学総合研究所・放射発生装置利用技術開発課・課長
研究者番号: 60260238